

# ANÁLISIS DE UNA ZONA DE CONFLUENCIA DE UN SISTEMA VIAL A TRAVÉS DE MODELOS DE SIMULACIÓN: UN CASO PARTICULAR

## ANALYSIS OF A ROAD SYSTEM MERGING ZONE THROUGH A SIMULATION MODEL. ONE SPECIAL CASE

Sergio Augusto Fernández Henao\*  
Leonel Arias Montoya\*\*  
Liliana Margarita Portilla De Arias\*\*\*

Fernández H. Sergio A., Arias M. Leonel, Portilla Liliana M. *Sophia* N° 7 - 2011. ISSN: 194-8932 Págs. 173-183.

Recepción: Junio 20 de 2011

Aceptación: Agosto 10 de 2011

### RESUMEN

Esta investigación se enfoca en el análisis del comportamiento del tráfico vehicular mediante la simulación de escenarios reales, con el objetivo de ilustrar las ventajas estadísticas que trae consigo la simulación, de tal manera que se pueda caracterizar la situación actual y buscar un mejoramiento del flujo vehicular en un tiempo razonable y con costos bajos. Para ello, se ilustra en este documento la simulación de un caso particular que comprende el circuito enmarcado en la carrera 7ª entre calles 15 y 20 de la ciudad de Pereira, en el cual se introducen variables relevantes, tales como: Tiempos de ciclos de los semáforos, los desfases de tiempos entre estos, entradas promedio de vehículos al circuito, entre otras. Estas variables se obtuvieron presencialmente en el circuito de estudio a distintas horas del día y todos los días de la semana exceptuando los días domingos, esto con el fin de obtener promedios que abarcaran las horas pico y las horas llano de la congestión vehicular del sistema evaluado. Una vez obtenidos los valores, se elaboró el modelo de simulación y se corrió en un software especializado. Los resultados obtenidos se contrastaron con la realidad, logrando un porcentaje promedio de error del 5,71%. Finalmente se plantearon diferentes programaciones de tiempos y sus desfases, con el fin de encontrar un modelo que mejore el sistema actual de la población objetivo. Logrando así, una configuración que genera un mejoramiento aproximado del 13% en el flujo vehicular para el circuito analizado.

### PALABRAS CLAVE

Congestión, Desfase, Error Aleatorio, Flujo, Hipótesis, Simulación, Teoría de colas, Tráfico.

\* Universidad Tecnológica de Pereira. Docente Asistente. Magíster en Investigación Operativa y Estadística. Ingeniero Industrial. [sfernandez@utp.edu.co](mailto:sfernandez@utp.edu.co). Grupo de Investigación "Análisis Envolvente de Datos", Categoría D. Colombia.

\*\* Universidad Tecnológica de Pereira. Docente Asociado. Magíster en Administración Económica y Financiera. Ingeniero Industrial. [leoarias@utp.edu.co](mailto:leoarias@utp.edu.co). Grupo de Investigación "Administración del desarrollo humano y organizacional", Categoría B. Colombia.

\*\*\* Universidad Tecnológica de Pereira. Docente Asistente. Magíster en Administración Económica y Financiera. Administradora Financiera. [lilipor@utp.edu.co](mailto:lilipor@utp.edu.co). Grupo de Investigación "Administración del desarrollo humano y organizacional", Categoría B. Vereda La Julita, Pereira, Risaralda, Colombia.

**ABSTRACT**

*This research focuses on the analysis of the motor vehicle traffic through real scenarios simulation, in order to illustrate statistical advantages which come along with it, so a characterization of the current situation can be made seeking for an improvement on traffic flow within a reasonable time and lower costs. Therefore a particular case of simulation is documented within the area between 7th avenue and 15th and 20th street Pereira city, introducing relevant variables of study such as: traffic lights time cycles, lags between traffic lights times, motor vehicles flow within the circuit, among others. These variables were obtained in person from the circuit of study at different hours of the day, every day of the week, exception Sundays with the purpose of getting averages at peak hours, traffic congestion hours of the evaluated system. Once the values were obtained, the simulation model was built and ran, through specialized software. The results were compared with reality, achieving an average error rate of 5.71%. Finally, different configurations were analyzed, in order to find a model that will improve the current system. A 13% of improvement in traffic flow was achieved with the developed simulation.*

**KEY WORDS**

*Traffic Congestion, Gap, Hypothesis, Queuing, Theory, Random Error, Simulation, Traffic.*

**INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, se busca dar solución a cada problema de una manera rápida, eficiente y que se pueda probar antes de incurrir en gastos elevados o innecesarios de implementación. Por tal motivo, la simulación y el análisis de modelos matemáticos aplicados a situaciones reales, ha cobrado un valor importante para las organizaciones privadas y públicas, permitiendo encontrar soluciones a estos problemas en plazos de tiempo razonable. La simulación como método de estudio es una herramienta importante para explicar diferentes procesos que se dan en la vida cotidiana, como son los procesos de movilidad vehicular, procesos de producción, procesos administrativos, entre otros (Cao, 2003).

En esta investigación se utiliza la simulación para conocer el comportamiento de un circuito vial importante en la ciudad de Pereira. Este circuito está comprendido por la carrera 7ª entre calles 15 y 20, el cual es una de las entradas al centro de Pereira que representa una gran importancia en las actividades comerciales de la ciudad, además de que presenta un gran flujo de vehículos y peatones provenientes del municipio de Dosquebradas, lo cual genera congestiones en la movilidad vehicular de la zona. Por tal motivo es claro que un mejoramiento de la movilidad en este tramo de la carrera 7ª, ocasionará un descongestionamiento vehicular relevante del centro de Pereira.

Dado lo anterior, se eligió ese circuito de flujo vial para implementar el estudio de simulación, de tal manera que, el lector pueda observar las ventajas de la metodología aplicada y a la vez, el resultado del mejoramiento que se puede dar en el flujo

vehicular en este trayecto de la ciudad sin incurrir en costos adicionales.

La programación de los semáforos en esta zona desempeña un papel importante, ya que ésta controla la cantidad de vehículos que pueden ser atendidos en un tiempo determinado. Por lo cual, se mencionan a continuación algunos conceptos sobre tráfico y tránsito vehicular, teoría de colas y simulación, para así, contar con una ambientación adecuada sobre las bases teóricas en las que se soporta el modelo de simulación desarrollado.

**TRÁFICO Y TRANSITO VEHICULAR.**

El tránsito vehicular es el fenómeno causado por el flujo de vehículos en una vía, calle o autopista. Se presenta también con muchas similitudes en otros fenómenos como el flujo de partículas (líquidos, gases o sólidos) y el de peatones. En español no existe la diferenciación que se hace en inglés entre las palabras “tránsito” y “tráfico”. En inglés, la primera (“transit”) se refiere exclusivamente a lo que en español puede llamarse “transporte público”, mientras que la segunda (“tráfico”) es aproximadamente igual a “tráfico vehicular” o “tránsito vehicular”. En castellano suele utilizarse “tránsito” para describir el flujo de elementos con movilidad y “tráfico” a los elementos transportados por otro medio. En las grandes ciudades, el tráfico vehicular se encuentra presente en casi todas las esferas de la actividad diaria de la gente, y ocasiona numerosos fenómenos entre los que destacan especialmente los congestionamientos.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Adaptado de [http://es.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%A1nsito\\_vehicular](http://es.wikipedia.org/wiki/Tr%C3%A1nsito_vehicular)

Entre los términos conceptuales más relevantes se tienen los siguientes (García 2008):

**Intersección:** Es el espacio físico compartido por varias líneas de flujo donde se presenta conflicto de movimientos entre estas.

**Corredor:** Es una vía continua compuesta por varias intersecciones.

**Ciclo:** Tiempo total que requiere una sucesión completa de los intervalos de un semáforo.

**Fase:** Es una parte del ciclo donde se le asigna el derecho de vía a un flujo de movimientos no conflictivos entre sí.

**Intervalo:** Tiempo durante el cual el semáforo presenta la misma señal.

**Plan de señales:** Es la presentación gráfica de los tiempos que se le asignan a cada fase de cada intersección para la coordinación de un corredor.

**Coordinación:** Es la acción de programar las intersecciones semaforizadas de tal forma que el flujo de un corredor pueda alcanzar una velocidad constante sin detenciones.

**Tiempo de verde:** Es el encendido paulatino de verde para que a lo largo del corredor, el flujo se presente ininterrumpido, lo que se logra con el establecimiento de una velocidad constante (teórica y asumida) para el corredor a programar.

**Diagramas de espacio - tiempo:** Es la representación gráfica del espacio existente entre intersecciones de un corredor y el tiempo de ciclo de cada intersección. Este diagrama muestra la coordinación de corredores y Tiempo de verdes.

**Desfase:** Es el tiempo que existe entre dos intersecciones semaforizadas a una velocidad constante (Teórica y asumida).

**Relación v/c:** Es la relación entre volumen y la capacidad de las intersecciones semaforizadas.

**Flujo de saturación:** Es el número de vehículos por hora que pueden pasar por un carril de una intersección suponiendo que siempre este en la fase verde.

Es importante resaltar que la semaforización en las intersecciones viales es fundamental para

que exista un equilibrio en el flujo de entrada y salida de las calles y carreras, es por eso que la función principal de un semáforo en el control de una intersección es dar el paso alternativamente a los distintos grupos de vehículos, peatones, bicicletas y/u otro sistema de transporte, de tal manera que estos pasen a través de la intersección con un mínimo de problemas, riesgos y demoras (Valencia, 2000).

Igualmente, la coordinación de las intersecciones de un itinerario es relevante en el tema del flujo vehicular, ésta consiste en programar el encendido de las luces de los semáforos de tal forma que los vehículos puedan atravesar la vía, de extremo a extremo, a una velocidad constante y sin detenerse (Tiempo de verde). Para ello es necesario determinar el desfase entre el instante de encendido de las luces verdes de los diferentes cruces. Este desfase viene dado en función de la velocidad deseada y de las distancias entre intersecciones (Díaz, 2002).

Por último, los niveles de servicio para las intersecciones controladas con semáforo, hacen parte de las variables de estudio relevantes en este tipo de sistemas. Dichos niveles se definen de acuerdo con la demanda que deben soportar los conductores, en la que también hay consumo de combustible y pérdida de tiempo. De esta manera, los niveles de servicio se establecen como: La demora promedio por parada de cada vehículo (Cal, 2005).

## TEORÍA DE COLAS

La teoría de colas (Render, 2006) es el estudio de una técnica basada en la Investigación de operaciones para solucionar problemas que se presentan en las situaciones en las cuales se forman turnos de espera o colas para la prestación de un servicio o ejecución de un trabajo.

En el campo de la investigación se analizan muy poco los factores subjetivos y la percepción de eficiencia por parte de los clientes o usuarios del servicio, aunque en ocasiones este es el factor que hace el peso mayor, o por lo menos muy importante en la solución del problema. La evaluación de los aspectos subjetivos que acompañan el factor matemático en la toma de decisiones en problemas

de colas de espera van a tener un distinto peso o valoración, según cada situación, y por ello dentro del modelo planteado se busca contribuir al análisis global de los problemas de línea de espera en situación de servicio por intermedio de personas.

Entre los términos más importantes que comprende la teoría de colas (Anderson, 2005), se encuentran “Los Clientes” que hacen referencia a la entidad que llega al sistema como los son: Carros esperando en un semáforo, máquinas que esperan ser reparadas, aviones esperando aterrizar, entre otros. “La Llegadas” que se refieren al número de clientes que llegan a las instalaciones de servicio. “La Tasa de Servicio” que se usa para designar la capacidad de servicio, el cual puede ser brindado por un servidor o por servidores múltiples. “La Tasa de Llegadas” que describe en unidades de tiempo la alimentación del sistema. “El Servidor” el cual es el encargado de brindar el servicio respectivo al cliente. “La Capacidad de la Cola” la cual puede ser infinita o finita. Dado lo anterior, se puede presentar diferentes tipos de modelos de colas, los cuales tienen sus correspondientes medidas de eficiencia que permiten caracterizar el correspondiente sistema. Para esta investigación se trabajó con un modelo en serie conectado por diferentes colas, en donde cada semáforo se tomó como servidor y cada cola hace referencia a cada tramo del circuito, tal como se ilustra en la figura 1.

Llegadas



Figura 1. Sistema de una cola con servidores secuenciales.

## SIMULACIÓN

La simulación de sistemas ofrece un método para analizar el comportamiento de un sistema específico. Aunque los sistemas varían en sus características y complejidades, la síntesis de la formación de modelos, la ciencia de la computación, y las técnicas estadísticas que representa este tipo de simulación; constituye un conjunto útil de métodos para aprender sobre estas características y complejidades e imponerles una estructura (Fernández, 2010).

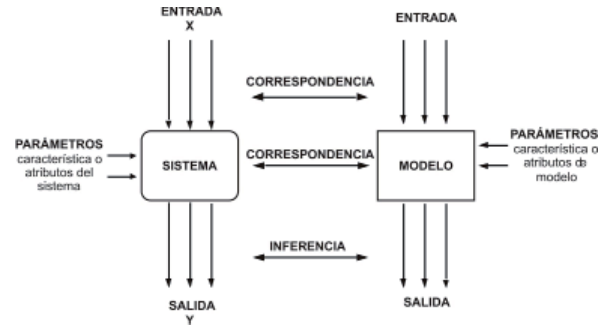


Figura 2. Relación entre sistema y modelo.

Para comprender las características técnicas de este enfoque y aplicarlas a un problema real, es necesario familiarizarse con los conceptos que describen un sistema y su respectivo modelo. De esta manera la relación de un sistema real con su respectivo modelo para ser representado y analizado, se puede explicar mediante la figura 2, en donde se observa como a través de la elaboración de un modelo que caracterice de manera adecuada el sistema en cuestión, se puede inferir sobre el comportamiento de dicho sistema acertadamente y tomar decisiones confiables.

El modelo de simulación que representa el sistema de estudio debe contener unos componentes básicos tal como se ilustra en la figura 3.



Figura 3. Componentes básicos de un modelo de simulación.

El componente de “Entidad” se utiliza para referirse a todo lo que el sistema procesa (Una pieza, un producto, una orden, un vehículo, etc.). Las “Locaciones” representan los lugares fijos en el sistema a dónde se dirigen las entidades por procesar, el almacenamiento, o alguna otra actividad o fabricación (Una maquina, un área de trabajo, un área de espera, una cola, un semáforo etc.).

Las “Llegadas” indican cada cuanto y en que cantidad llegan nuevas entidades al sistema, esto con el fin de alimentar el sistema y activar su procesamiento. Un “Recurso” es un operario, o una maquina que sirve para transportar, realizar operaciones puntuales, mantenimientos o asistencias complementarias para el procesamiento de entidades. Una “Red de Rutas” se utiliza básicamente para construir caminos fijos por los cuales se mueven los recursos (operarios, maquinas, etc.) para transportar entidades. Las “Variables” son útiles para capturar y guardar información numérica, de tipo real o entera, para ser utilizada en cálculos de ciertas estadísticas detalladas que puedan requerirse o para ciertos condicionamientos y/o restricciones del sistema analizado. El “Atributo” es una condición inicial (como una marca), la cual puede ser asignada a entidades o a locaciones; entre ellos pueden contarse el peso de un material, su dureza, o cualquier otra característica ya sea física, química o de cualquier otro tipo que se quiera asignar a una entidad o locación. Este último, también puede utilizarse como medio para obtener información más detallada del sistema, por ejemplo tiempos de ciclo o niveles de eficiencia de laguna estación de trabajo. El componente de “Proceso” define las rutas y las operaciones que se llevaran a cabo en las locaciones para las entidades en su viaje por el sistema. Generalmente se apoya en los diagramas de proceso u operación que se tienen para cada producto o servicio a simular. Por tal motivo es el último componente que se elabora, ya que necesita de los componentes ya mencionados para vincularlos en su construcción (García, 2006).

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este documento presenta el desarrollo de un enfoque metodológico aplicado al análisis del flujo vial, mediante la utilización de herramientas propias de la simulación apoyada de la teoría de colas, con el objetivo de presentar una solución de buena calidad, la cual ayude a mejorar la movilidad en el sector de la carrera 7ª entre calles 15 y 20. Este enfoque se desarrolla en las siguientes 3 fases:

La fase 1, consiste en la toma de la información para realizar la descripción estadística de la situación actual de la carrera 7ª entre calles 15 y 20, tal

como se mencionó en la introducción. Con base en dicha información, se construyó el modelo de Simulación en el software Promodel. Para ello, se tuvo en cuenta cada intersección con sus semáforos y colas promedio, longitud de los vehículos, tasa de reparto, tiempos de programación actual de los semáforos, entre otras variables.

La fase 2, se enfoca en la validación del modelo de simulación. Para ello, se comparó los valores promedio obtenidos en el proceso de la estadística descriptiva y los valores que arroja el modelo de simulación propuesto. Con estos valores, se calculó el porcentaje de error que presenta el modelo utilizando la fórmula 1 (Friedman, 1998).

$$\% \text{ Error} = \frac{\text{Situación actual} - \text{Modelos simulado}}{\text{Situación natural}} \quad [1]$$

Una vez aceptado el grado de representatividad del modelo, se pasa a la fase 3, en donde se propone ciertos cambios a la configuración actual del sistema, con lo cual se realiza la correspondiente simulación, de tal manera, que se logre elegir una alternativa de buena calidad que mejore el flujo vial.

## COMPONENTES DEL MODELO A SIMULAR

La simulación de la situación actual del tráfico vehicular de la población objetivo, es alimentada por 3 tipos diferentes de vehículos, los cuales entran a este circuito, estos se caracterizan por su longitud y su velocidad promedio en el recorrido. Con base a lo anterior, los componentes del modelo tienen las siguientes características:

Las “Entidades” hacen referencia a los vehículos que circulan por el circuito, se tienen 3 tipos que son: Carro, Camioneta y Camión, sus características se pueden observar en la siguiente tabla 1.

VEHICULO	LONGITUD*	VELOCIDAD*
Carro	3 m	30 Km/h
Camioneta	4 m	30 Km/h
Camión	7 m	20 Km/h

\* Valores promedio según toma de datos.

**Tabla 1.** Descripción de los vehículos.



Las “Locaciones” para este modelo son de 3 tipos que son: Los semáforos, los cuales contienen un tiempo de parada “Downtime” de tipo “Usage”, estos representan el ciclo de programación de los semáforos, el segundo tipo son las estaciones que representan las calles y tramos de la carrera 7ª, su característica es que definen la capacidad de albergar determinada cantidad de vehículos según su longitud y el tercer tipo son las salidas de cada circuito, las cuales tienen el objetivo permitir contabilizar las salidas de vehículos por cada uno de estos tramos. La tabla 2, presenta el resumen de las estaciones mencionadas con sus correspondientes capacidades.

El componente de “Llegadas” está alimentado con las llegadas de las entidades por los 5 accesos que tienen al circuito, los cuales son la carrera 7ª en la calle 15 y por las calles 16, 17, 19 y 20. Además este componente se divide en 3 grupos, esto se debe a la diferencia en las frecuencias de llegadas de las entidades. Las cuales, según toma de datos previo a la simulación, arrojaron los resultados que aparecen en la tabla 3 de la participación del tráfico por el circuito.

NOMBRECAPACIDAD	UNIDADES	
primero7	1	1
segundo7	1	1
tercero7	1	1
cuarto7	1	1
sem16	1	1
sem17	1	1
sem19	1	1
sem20	1	1
cra_15y16	13	1
cra_16y17	13	1
cra_19y17	24	1

NOMBRECAPACIDAD	UNIDADES	
cra_20y19	13	1
calle16	13	1
calle17	13	1
calle19	13	1
calle20	13	1
salida16	1	1
salida17	1	1
salida19	1	1
salida20	1	1
salida7	1	1

**Tabla 2.** Locaciones del modelo simulado.

ENTIDAD	% PARTICIPACIÓN
Carro	84%
Camioneta	14%
Camión	2%

**Tabla 3.** Participación en el tráfico por entidad.

Las llegadas al circuito se resumen en la tabla 4, en la cual, se detallan los parámetros utilizados para describir el arribo de las entidades al circuito analizado, por ejemplo, se observa que para todas las entidades se tienen llegadas de a un vehículo a la vez con un frecuencia de llegada exponencial diferente para cada tipo de vehículo y determinado por el acceso que llegue al circuito.

Lo anterior asegura cómo en la realidad se presenta un flujo continuo de vehículos por cada una de las calles del circuito analizado. Cabe anotar que la columna de “Primera Vez” indica que en el momento de comenzar la simulación, se cuenta con el sistema cargado y las “Ocurrencias” son infinitas hasta el tiempo de parada del cual se habla más adelante.

ENTIDAD	LOCACIÓN	CANT	PRIMERA VEZ Minutos (Exp)	OCURENCIAS	FRECUENCIA
Carro					0.155
Camioneta	Cra.15 y 16	1	0	Infinitas	0.932
Camión					6.536
Carro					0.178
Camioneta	Calle 16	1	0	Infinitas	1.072
Camión					7.519
Carro					0.198
Camioneta	Calle 17	1	0	Infinitas	1.190
Camión					8.333
Carro					0.137
Camioneta	Calle 19	1	0	Infinitas	0.824
Camión					5.780
Carro					0.143
Camioneta	Calle 20	1	0	Infinitas	0.857
Camión					6.024

**Tabla 4.** Descripción de las llegadas al sistema.

El componente de las “Variables” se utilizó con la finalidad de estimar el tamaño de las colas en cada una de los tramos de la carrera 7ª y de las calles del sistema, tomando cada una de las entradas de cualquier entidad y restando las salidas del tramo estudiado, esto con el fin de tener control sobre la cantidad de los vehículos que transitan por el sistema. Para este modulo se cuenta con la información de la siguientes tabla 5, que hace referencia a las 8 variables utilizadas.

NOMBRE	TIPO	NOMBRE	TIPO
Cola_15y16	Entero	Cola_16_7y6	Entero
Cola_17y16	Entero	Cola_17_8y7	Entero
Cola_19y17	Entero	Cola_19_8y7	Entero
Cola_20y19	Entero	Cola_20_7y6	Entero

**Tabla 5.** Descripción de las variables utilizadas.

En el componente de “Procesamiento” se ejecuta un sistema de semáforos (estaciones) en secuencia con sus intersecciones, teniendo en cuenta que cada uno de estas funciona como líneas de espera diferentes, y tienen un comportamiento igualmente diferente en el cual cada una de ellas posee tiempos diferentes.

Los siguientes pasos generalizan dicho proceso de movilidad para todos los vehículos contemplados en la simulación:

1. Un vehículo ingresa al circuito (carrera 7ª y calles).
2. Este incrementa una de las variables según sea el sitio en el cual ingrese al circuito.
3. El vehículo toma una posición en la cola.
4. Este espera hasta ser atendido por el servidor (semáforo).
5. La cola espera hasta que el servidor de la señal de luz verde, este es simulado como un “Downtime” el cual genera intervalos de tiempo para dar los cambio de luces.
6. Los vehículos de la cola empiezan a ser atendidos según su orden de llegada.

7. En este momento una de las variables según su posición se decrementa en la cantidad de vehículos que hayan sido atendidos por el semáforo en verde.
8. Estos vehículos atendidos tienen la opción de continuar en el circuito de la carrera séptima o salir por una de sus calles.
9. De seguir en el sistema estos vehículos repiten el proceso desde el numeral uno.

Como se observa, este proceso controla las entradas y salidas con el ánimo de llevar un control sobre la cantidad de vehículos que son atendidos y transitan en el sistema, este es un problema típico de teoría de colas, en el cual un cliente ingresa a un sistema y este es atendido por un servidor según una tasa de servicio cumpliendo con el concepto FIFO (First In First Out).

La figura 4, presenta el “Layout” del modelo simulado, en donde, los rectángulos negros representan la carrera 7ª desde la calle 15 hasta la 20 y las calles 16, 17, 19 y 20 de derecha a izquierda, por donde transitan los vehículos.

Cabe anotar, que la calle 18 desde la carrera 6ª hasta la carrera 8ª es únicamente peatonal, por lo tanto, en este trayecto la carrera 7ª presenta un rectángulo más amplio que los demás, ya que abarca desde la calle 17 hasta la 19. **Figura 4.**



**Figura 4.** Representación gráfica del sistema vial a simular.

## RESULTADOS

Con los datos estadísticos que arroja el modelo simulado se pudo evidenciar que la carrera 7ª presenta una alta tasa de utilización entre el circuito analizado (ver figura 5), esto sustenta la congestión vehicular que presenta dicho tramo, lo cual, genera un tiempo alto de desplazamiento vehicular por esta zona (ver figura 6). Por lo que, se debe buscar una configuración más adecuada de los tiempos de verde para los semáforos que comprenden dicha zona, en pro de disminuir la congestión.

### 1. Estadística relevante del modelo simulado

En la figura 5 se observa que el tramo de la carrera 7ª entre las calles 17 y 19, es el más crítico con un porcentaje promedio de utilización de 85.31%. Igualmente, las calles 19 y 20 presentan la mayor congestión de las cuatro calles analizadas con una tasa de utilización de 79% y 70.07% respectivamente.

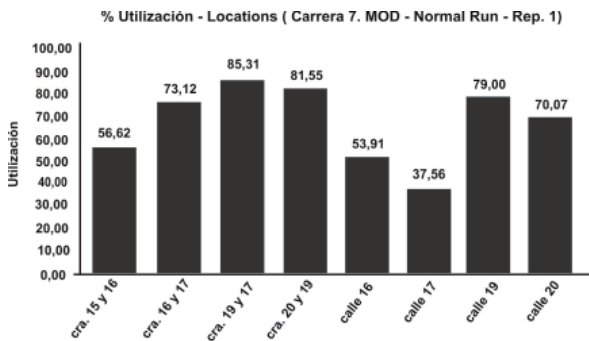


Figura 5. Porcentaje de utilización para cada tramo vehicular.

Los tiempos máximos de desplazamiento de los vehículos en el sistema, se observan en la figura 6, donde aquellos vehículos que realizan el recorrido completo en la carrera 7ª entre las calles 15 y 20, afrontan tiempos de desplazamiento que rondan los 15 minutos, lo cual, es un valor relativamente alto para este tramo de aproximadamente 500 metros.

En esta figura 6, también se puede corroborar una vez más la congestión presentada en el circuito, al observar que los tiempos de desplazamiento de un vehículo que se encuentra en la calle 19 o en la calle 20, puede subir hasta los 13 y 14 minutos respectivamente, siendo unos valores muy altos para un trayecto tan corto de aproximadamente 100 metros en cada calle.

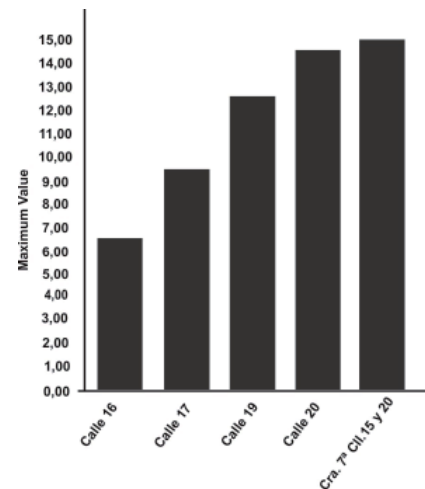


Figura 6. Tiempo máximo de recorrido para cada tramo vehicular

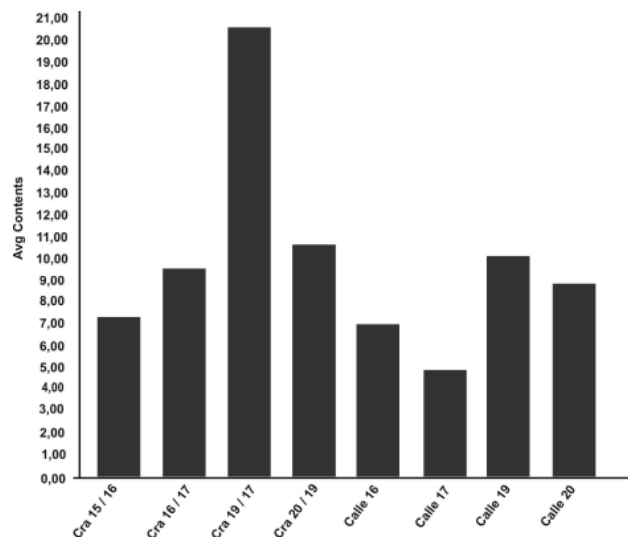


Figura 7. Cantidad de vehículos promedio en la cola de cada semáforo.

El tramo de la carrera 7ª entre las calles 17 y 19, presentan el mayor número de vehículos en promedio haciendo cola, tal como se observa en la figura 7. Esto se debe a que es el tramo más largo del circuito analizado. El contenido promedio de vehículos haciendo cola en las calles 19 y 20, son nuevamente los más altos de las cuatro calles analizadas, reiterando una vez que este tramo del circuito es el más crítico de todos. Finalmente, se puede estimar que en promedio hay 48 vehículos haciendo cola en un momento dado sobre la carrera séptima entre las calles 15 y 20, lo cual, es igualmente una cantidad relevante de vehículos en este circuito.



## 2. Validación del modelo simulado

Con el fin de comprobar que el modelo simulado concuerda con la situación actual del sistema y a la vez, sustentar la confiabilidad del ajuste obtenido del proceso de movilidad vehicular de la carrera 7ª y sus intersecciones desde la calle 15 hasta la calle 20, se realiza la segunda fase del proceso metodológico de este trabajo.

Para esto, se utilizó la fórmula 1 citada en el numeral anterior. La siguiente tabla 5, presenta los resultados de los datos reales y simulados, en relación a la cantidad promedio de vehículos haciendo cola en los tramos del circuito analizado.

TRAMO	ACTUAL	SIMULADO	% DE ERROR
Cra. 7ª entre 15 y 16	7	7.36	5,1%
Cra. 7ª entre 16 y 17	10	9.51	4,9%
Cra. 7ª entre 17 y 19	22	20.47	7,0%
Cra. 7ª entre 19 y 20	17	16.60	2,4%
Calle 16	8	7.01	12,4%
Calle 17	5	4.88	2,4%
Calle 19	10	10.27	2,7%
Calle 20	10	9.11	8,9%

**Tabla 5.** Comparación de la cantidad de vehículos promedio en la cola de cada semáforo.

Como se puede observar en la tabla 5 el porcentaje de error que presenta el modelo simulado para una de las variables relevantes de estudio, (la cual es la cantidad promedio de vehículos haciendo cola en cada semáforo del circuito analizado), oscila entre 2,4% y 12,4%, es decir que el porcentaje promedio de error del modelo simulado es de 5,71%. Esto indica que el modelo simulado presenta un ajuste muy bueno sobre el sistema real, de tal manera, que da pie para continuar con la tercera fase de la investigación, la cual, como ya se mencionó, consiste en proponer ciertos cambios en la configuración existente en el sistema, en busca de disminuir su congestión vehicular.

## 3. Análisis de escenarios propuestos

Para realizar las propuestas, fue necesario tener en cuenta que sólo es posible cambiar las variables controlables, para este caso, estas son: Los tiempos de servicio y los desfases entre semáforos. Estos valores son operados por el organismo de tránsito de la ciudad de Pereira. Con este concepto claro, se propuso tres escenarios,

los cuales fueron simulados nuevamente en el software Promodel.

Para el primer escenario, se propuso una configuración en donde se conservaron los tiempos de verde y rojo, se calculó el tiempo de recorrido de los vehículos entre semáforos y se programó este tiempo en los desfases. La tabla 6 presenta el resumen de los cambios propuestos.

SEMÁFORO	Verde (seg)	Desfase (seg)	Rojo(seg)
Cra. 7ª SEM 1	16	30	25
Cra. 7ª SEM 2	16	20	25
Cra. 7ª SEM 3	28	10	43
Cra. 7ª SEM 4	28	0	43
calle 16	16	55	25
calle 17	16	45	25
calle 19	28	53	43
calle 20	18	28	28

**Tabla 6.** Primer escenario propuesto.

Para el segundo escenario propuesto se programaron en cero los desfases sobre la carrera 7ª, es decir, se obviaron y se trabajó con los mismos tiempos de ciclos en la situación actual, pero dándole un mayor tiempo de paso (verde) sobre la carrera 7ª y a su vez, disminuyendo dicho tiempo en las intersecciones, es decir, en las calles 16, 17 19 y 20. La tabla 7 presenta el resumen de los cambios propuestos.

En el tercer escenario se obviaron nuevamente los tiempos de desfase de la carrera 7ª, pero se trabajó con ciclos medios e iguales en todos los semáforos del circuito, con mayor tiempo de rojo que de verde e iguales para todos. La tabla 8 presenta el resumen de los cambios propuestos para este escenario.

SEMÁFORO	Verde (seg)	Desfase (seg)	Rojo(seg)
Cra. 7ª SEM 1	25	0	16
Cra. 7ª SEM 2	25	0	16
Cra. 7ª SEM 3	43	0	28
Cra. 7ª SEM 4	43	0	28
calle 16	25	16	16
calle 17	25	16	16
calle 19	43	28	28
calle 20	28	18	18

**Tabla 7.** Segundo escenario propuesto.

SEMÁFORO	Verde (seg)	Desfase (seg)	Rojo(seg)
Cra. 7ª SEM 1	30	0	40
Cra. 7ª SEM 2	30	0	40
Cra. 7ª SEM 3	30	0	40
Cra. 7ª SEM 4	30	0	40
calle 16	30	40	40
calle 17	30	40	40
calle 19	30	40	40
calle 20	30	40	40

**Tabla 8.** Tercer escenario propuesto.

En la tabla 9, se presenta los resultados obtenidos respecto a la variable “Número promedio de vehículos haciendo cola”, después de correr los diferentes modelos propuestos de simulación (el tiempo de corrida fue de 12 horas, de tal manera, que se pudiera comparar los resultados con los valores estimados en la situación actual del sistema, los cuales fueron tomados y promediados en el mismo rango de tiempo).

En esta tabla se puede observar algunas diferencias que empiezan a ser significativas con respecto a la situación actual del circuito, por ejemplo, se puede observar como se disminuyen los promedios de todas las colas en los escenarios propuestos, siendo el escenario 1 la solución de mejor calidad para el sistema de estudio, con base al análisis de esta variable. Además, si se calcula el total de vehículos haciendo cola en cada uno de los escenarios y se evalúa la tasa de cambio respecto al sistema actual, se obtiene que el escenario 1 logra la mayor tasa con un valor a favor de 13,91% (esto quiere decir que se pasa de un total de 89 vehículos en el sistema real a un total estimado de 76.62 vehículos con la configuración propuesta en el escenario 1)

Semáforo	Actual	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Cra. 7ª SEM 1	7	7,00	7,37	7,66
Cra. 7ª SEM 2	10	9,40	9,91	9,89
Cra. 7ª SEM 3	22	20,02	20,98	20,82
Cra. 7ª SEM 4	17	10,47	10,59	10,51
Calle 16	8	6,07	6,64	6,62
Calle 17	5	4,60	5,39	4,62
Calle 19	10	10,15	10,10	10,23
Calle 20	10	8,91	8,88	9,72

**Tabla 9.** Cuadro comparativo de unidades promedio en cola.

Otro resultado relevante, tiene que ver con el análisis de la variable “Tiempo promedio de espera en cada tramo del circuito”. La tabla 10 presenta los valores obtenidos para el sistema actual y los tres escenarios propuestos, en donde nuevamente se observa que el primer escenario es el que dio la solución de mejor calidad, obteniendo una tasa de cambio a favor de 6.15 %.

Semáforo	Actual	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Cra. 7ª SEM 1	1,29	1,14	1,28	1,32
Cra. 7ª SEM 2	1,62	1,51	1,67	1,68
Cra. 7ª SEM 3	2,77	2,62	2,86	2,82
Cra. 7ª SEM 4	1,29	1,26	1,31	1,28
Calle 16	1,22	1,03	1,15	1,15
Calle 17	0,88	0,84	1,01	0,86
Calle 19	1,71	1,69	1,71	1,70
Calle 20	1,42	1,36	1,37	1,51

**Tabla 10.** Cuadro comparativo del tiempo promedio en cola en minutos.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con las conclusiones obtenidas mediante el análisis de las figuras 5, 6 y 7, se observa claramente que la carrera 7ª presenta una zona crítica de alta congestión vehicular, comprendida principalmente desde la calle 17 hasta la calle 20, lo anterior a causa de las llegadas de vehículos desde el sector de Dosquebradas y por la alimentación permanente y relevante por las calles 19 y 20. Es claro que el análisis de estos sistemas se vuelve cada vez más complejo en la medida en que se adicionen más variables que sean difícilmente controlables. Sin embargo, el caso que se ha presentado en este documento, permite el establecimiento de una metodología que busca simplificar el problema de estudio y así, poder obtener una mayor comprensión de este.

Con los resultados de la fase de validación, se puede confiar en el modelo simulado, ya que se obtuvo un porcentaje de error promedio de 5,71%. Lo cual indica que el modelo presenta un buen ajuste. Se puede llegar a esta conclusión, ya que, en la literatura se aceptan modelos con porcentajes de error entre 0 y el 10 %.

Con base a la solución de mejor calidad encontrada, la cual, se refiere al primer escenario, en donde

sólo se modifican los tiempos de desfase, se puede resaltar que es una configuración aterrizada y no genera costos en su implementación. Por tal motivo, se puede concluir que en muchas ocasiones basta con ajustar correctamente los tiempos de un circuito para mejorar su correspondiente flujo.

## CONCLUSIONES

Con el desarrollo de esta investigación, se ratifica la pertinencia del uso de los modelos de simulación en este tipo de escenarios, en donde, se puede proponer diferentes configuraciones del sistema y evaluarlas sin necesidad de incurrir en tiempo y costos elevados. Esto con el fin de identificar las posibles mejoras que se pueden realizar en el sistema objeto de estudio.

Es importante garantizar la confiabilidad de los modelos simulados, ya que, a partir de los resultados que generan, se busca tomar decisiones relevantes. Por lo tanto, se debe contrastar la información que arroja el modelo con resultados reales, como pueden ser resultados de otras investigaciones, situaciones de la vida real, opiniones de expertos en los diferentes temas, entre otras. En este caso, se logró un porcentaje de error promedio de 5,71% para el modelo planteado, lo cual, indica un buen ajuste del sistema simulado respecto al sistema real.

Con los resultados obtenidos en esta investigación, se logró demostrar que con la propuesta del escenario 1, que hace referencia a una adecuada sincronización en los desfases de los semáforos (efecto de ola verde), se puede mejorar la movilidad de un circuito de múltiples intersecciones con semáforos en línea. Lo anterior se comprueba al observar los resultados de dicho escenario, en donde se genera una disminución promedio de 13,91% en la cantidad de vehículos en cola e igualmente una disminución de 6,15% del tiempo promedio de los vehículos en la cola de cada tramo del circuito analizado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, David, SWEENEY, Dennis, WILLIAMS, Thomas. (2009), Encuestas muestrales. En Capítulo 22 en "Estadística para Administración y Economía" Décima Edición, Editorial Cengage Learning.

\_\_\_\_\_. (2005) Modelos de línea de espera y Simulación. Capítulos 15 y 16. En Métodos Cuantitativos para los Negocios. Paraninfo.

BARBOSA Rodrigo, ROJAS Alfredo. (1995) Teoría de colas de espera, Modelo integral de aplicación para la toma de decisiones.

BOTERO GARCÍA, Tomas. (2008) Revisión y rediseño de la planeación semafórica de las intersecciones viales de la ciudad de Manizales. Universidad Nacional. Sede Manizales.

CAL MAYOR, Rafael. (2000) Ingeniería de tránsito transporte. México.

CAO, H., CHENG, F., BUCKLEY, S. (2003) "A Simulation-based Tool for Inventory Analysis in a Server Manufacturing Environment", Proc. of the 2003 Winter Simulation Conference, New Orleans, Louisiana.

DÍAZ I. María, DÍAZ I. José, et al. (2002) Métodos geométricos de coordinación de intersecciones reguladas por semáforo. XIV Congreso Internacional de ingeniería Gráfica. España.

FERNÁNDEZ H. Sergio. (2010) "Enfoque metodológico aplicado a los sistemas de manufactura". Universidad Tecnológica de Pereira.

GARCÍA, Eduardo. GARCÍA Heriberto. CÁRDENAS Leopoldo. (2006) Simulación con Promodel. En Simulación y análisis de sistemas con Promodel. Pearson.

FRIEDMAN, L. W. and PRESSMAN, I. (1998), "The Metamodel in Simulation Analysis: Can it Be Trusted?", Journal of Operational Research Society, vol. 39, no 10, 939-948.

RENDER, B. STAIR R. HANNA M. (2006) Métodos cuantitativos para los negocios, Pearson.

VALENCIA ALAIX, Víctor Gabriel. (2000) Principios sobre semáforos. Universidad Nacional.